饱和吸收光谱

姓名 2x011xxxxx

ABSTRACT 饱和吸收光谱利用反向传播的泵浦光和探测光选择特定速度群，可分辨热运动多普勒展宽下的原子超精细结构。本实验搭建铷原子饱和吸收光路，以外腔半导体激光器扫描约 780 nm 的共振区域，观察共振荧光、谱组及遮挡泵浦光前后的透射信号。大范围扫描中辨认出三套谱，跳模限制了完整四套谱的同时观测；第一套谱中识别出三条真实跃迁峰和三条交叉峰。以已知超精细频差标定时间轴，估得交叉峰半高全宽约为 31 MHz。遮挡泵浦光后窄峰基本消失，验证了饱和作用对速度群的选择；观测线宽大于自然线宽，反映了实际光强、频率噪声和光路条件对光谱分辨率的影响。

KEYWORDS 饱和吸收光谱 · 铷原子 · 交叉峰

1. 原理概况

1.1. 铷原子的超精细结构与多普勒展宽

本实验研究铷原子在约 780 nm 处的 D2 线，即 $5S_{1/2} \to 5P_{3/2}$ 跃迁。电子总角动量与核自旋耦合，使基态和激发态进一步分裂为不同的超精细能级，以总角动量量子数 F 和 F' 分别标记。天然铷中的 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 各有两个基态超精细能级，因此完整的 D2 线吸收谱包含四组跃迁。电偶极跃迁满足 $\Delta F = 0, \pm 1$，但 $F = 0 \to F' = 0$ 禁戒；其中 ^{87}Rb 的基态 $F = 2$ 可跃迁至激发态 $F' = 1, 2, 3$。饱和吸收光谱通过分辨这些跃迁及其交叉峰，揭示普通吸收谱中被多普勒展宽掩盖的超精细结构 [1]。

设激光频率为 ν_{L}，原子的静止跃迁频率为 ν_0，原子沿激光传播方向的速度分量为 v_z，光速为 c。在 $|v_z| \ll c$ 时，原子感受到的光频率为

$$\nu' = \nu_{\mathrm{L}}\left(1 - \frac{v_z}{c}\right). \tag{1}$$

只有满足 $\nu' \simeq \nu_0$ 的速度群与激光共振。气室中原子的热运动使不同速度群在不同激光频率处发生吸收，形成宽的多普勒吸收背景。设原子质量为 m，气体温度为 T，玻尔兹曼常数为 k_{B}，麦克斯韦速度分布对应的多普勒线型近似为高斯型，其频率半高全宽为

$$\Delta\nu_{\mathrm{D}} = \frac{\nu_0}{c}\sqrt{\frac{8k_{\mathrm{B}}T\ln 2}{m}}. \tag{2}$$

室温下铷原子的多普勒宽度为数百兆赫兹，明显大于 D2 线约 6 MHz 的自然线宽，因而同一基态出发的多条超精细跃迁在普通吸收谱中相互重叠。

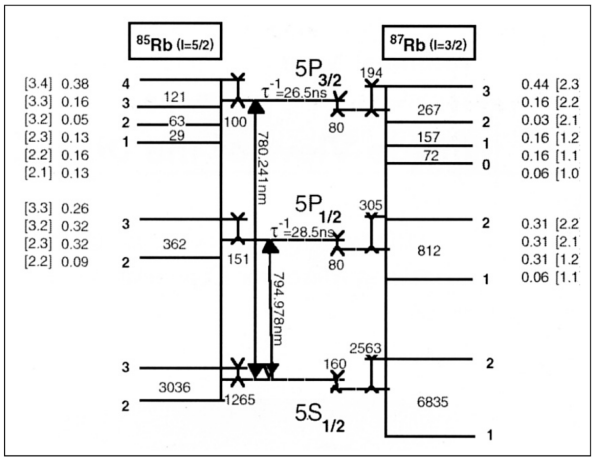


Figure 1 铷原子的超精细能级与 D1、D2 跃迁。

* email@pku.edu.cn

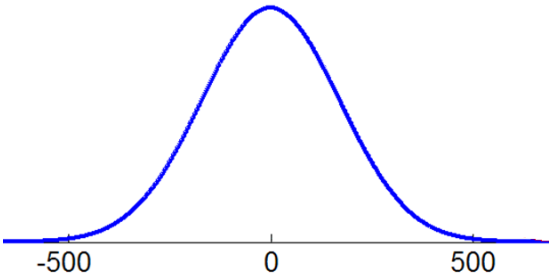


Figure 2 多普勒吸收线型示意。

1.2. Bennett 烧孔与饱和吸收

当较强激光与某一速度群共振时，原子由基态被激发至激发态，该速度群的基态布居减少，在基态原子的速度分布中形成凹陷，称为 Bennett 烧孔。随着光强增加，基态与激发态的布居差减小，吸收逐渐饱和。设泵浦光强为 I_{p}，相应跃迁的饱和光强为 I_{sat}，定义饱和参数 $s = I_{\mathrm{p}}/I_{\mathrm{sat}}$。在理想两能级模型中，若自然线宽以频率半高全宽 $\Delta\nu_{\mathrm{nat}}$ 表示，则烧孔的频率宽度满足

$$\Delta\nu_{\mathrm{hole}} = \Delta\nu_{\mathrm{nat}}\sqrt{1+s}. \tag{3}$$

因此，增强泵浦光有利于形成明显的饱和信号，同时也会引入功率展宽。

饱和吸收光路将同一激光分成较强的泵浦光和较弱的探测光，使两束光在铷泡中反向传播并在空间上重合。取探测光沿 $+z$ 方向传播，泵浦光沿 $-z$ 方向传播，原子感受到的两束光频率分别为

$$\begin{aligned} \nu'_{\mathrm{pr}} &= \nu_{\mathrm{L}}\left(1-\frac{v_z}{c}\right), \\ \nu'_{\mathrm{p}} &= \nu_{\mathrm{L}}\left(1+\frac{v_z}{c}\right). \end{aligned} \tag{4}$$

对于同一条跃迁，两束光同时与同一速度群共振的条件是

$$\nu'_{\mathrm{pr}} = \nu'_{\mathrm{p}} = \nu_0 \quad\Longrightarrow\quad v_z = 0, \qquad \nu_{\mathrm{L}} = \nu_0. \tag{5}$$

这里的零速度指沿光束方向的速度分量为零。此时泵浦光使该速度群的吸收饱和，探测光受到的吸收减弱，在透射信号的宽吸收凹陷上出现窄的向上透射峰，称为饱和吸收峰。该窄峰由选定的速度群产生，避免了整个热运动速度分布造成的多普勒展宽；宽的多普勒背景仍然保留在探测信号中。实际谱峰宽度还受到功率展宽、激光线宽及两束光对准情况等因素影响。

1.3. 交叉峰与谱峰识别

对共用同一基态、静止跃迁频率分别为 ν_a 和 ν_b 的两条跃迁，泵浦光和探测光还可分别与同一速度群的不同跃迁共振。例如满足

$$\nu_{\mathrm{L}}\left(1+\frac{v_z}{c}\right) = \nu_a, \qquad \nu_{\mathrm{L}}\left(1-\frac{v_z}{c}\right) = \nu_b \tag{6}$$

时，两式相加得到交叉峰的中心频率

$$\nu_{\mathrm{co}} = \frac{\nu_a+\nu_b}{2}. \tag{7}$$

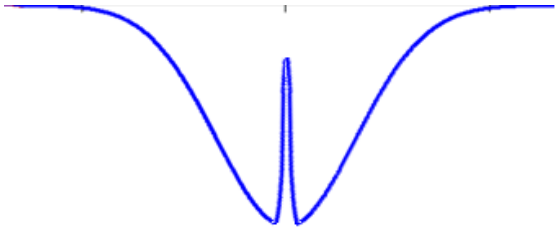


Figure 3 多普勒本底上的饱和吸收峰示意。

交换两束光对应的跃迁，还存在速度方向相反的另一群原子。因此，在两条真实跃迁频率的中点可以出现交叉饱和吸收峰。交叉峰来自两条已有跃迁对共同速度群的作用，其位置用于辅助辨认真实跃迁。

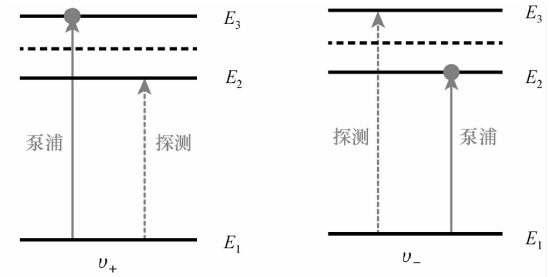


Figure 4 交叉共振的能级与速度群示意。

对于 ^{87}Rb 的 $F=2\to F'=1,2,3$ 跃迁，三条真实跃迁两两组合产生三个交叉峰，在各峰可分辨的条件下共形成六个峰。按光频率递增排列，它们依次为 $F'=1$ 的真实峰、$(1,2)$ 交叉峰、$F'=2$ 的真实峰、$(1,3)$ 交叉峰、$(2,3)$ 交叉峰和 $F'=3$ 的真实峰，其中 (a,b) 表示通向 $F'=a,b$ 的两条跃迁形成的交叉峰。示波器上的左右顺序由实际扫描方向决定，可结合已知能级间隔确定频率方向和峰的归属。

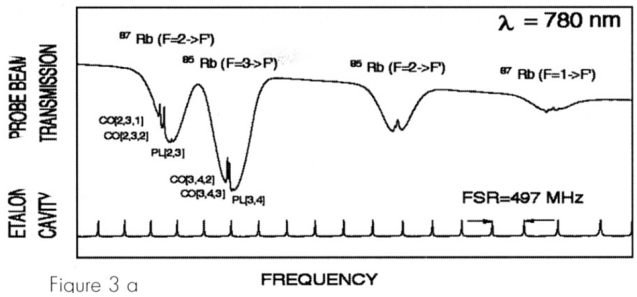


Figure 5 铷 D2 线典型饱和吸收谱及外腔模标尺。

1.4. 频率扫描与线宽标定

实验通过三角波驱动压电陶瓷（PZT），改变外腔长度以扫描激光频率，并将透射探测光的光电信号显示在示波器上。扫描幅度决定覆盖的频率范围，直流偏置改变扫描中心；工作电流用于配合调谐，使扫描范围落在原子共振附近。

在同一连续扫描分支、局部频率与时间近似线性的条件下，可用已知的超精细跃迁频差标定时间轴。设两个参考峰的已知频差为 $\Delta\nu_{\mathrm{ref}}$，示波器上对应的时间间隔为 Δt_{ref}，待测峰的时间半高全宽为 $\delta t_{1/2}$，则其频率半高全宽为

$$\Delta\nu_{1/2} = \Delta\nu_{\mathrm{ref}}\frac{\delta t_{1/2}}{\Delta t_{\mathrm{ref}}}. \tag{8}$$

例如，^{87}Rb 的 $F'=2$ 与 $F'=3$ 激发态间隔约为 267 MHz，可作为频差参考。半高位置应以待测窄峰相对于局部多普勒背景的峰高确定，参考峰与待测峰均应取自相同扫描条件。

2. 内容步骤

2.1. 实验装置与光路搭建

实验采用外腔半导体激光器及其电流、温度和 PZT 控制模块，以铷泡作为吸收介质，使用光电探测器和示波器记录透射光信号。光路由光隔离器、两面反射镜、半波片、偏振分束棱镜、高透低反镜和半透半反镜组成，配合荧光板、功率计和红外观察器进行调节 [1]。

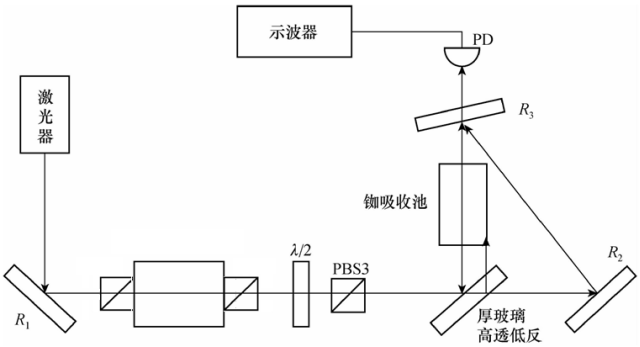


Figure 6 铷原子饱和吸收光谱实验光路。

先检查激光头与控制电源的连接，依次开启温度控制和电流控制，待温度稳定后缓慢增加电流，用荧光板确认激光输出。将光隔离器置于激光器之后，调节位置和角度，使光束顺利通过，并用功率计比较入射与透射功率，以透过率达到 80% 以上作为调节目标。随后放置第一面反射镜，使后续光束保持水平；安装半波片和偏振分束棱镜，使光束通过器件中心，并通过转动半波片调节进入实验光路的功率。

用厚玻璃片作为高透低反镜，将反射的弱光作为探测光，将透射的强光作为泵浦光。调节第二面反射镜和半透半反镜，使泵浦光从相反方向通过铷泡所在区域，与探测光重合。厚玻璃片前后表面产生两个反射光斑时，选取其中一个作为探测光。对准时在铷泡前后分别检查两束光的位置，使其在整个相互作用区域内重合。固定各元件后放入铷泡，使两束光均穿过气室的有效区域，将光电探测器置于探测光透射端进行探测。

2.2. 共振荧光寻找与频率扫描

将光电探测器输出接入示波器，先采用直流耦合，通过遮挡和放开探测光检查探测器响应，调整探测器位置及增益，使信号处于正常响应范围。观察谱线细节时可切换为交流耦合，并固定相应的耦合方式和增益设置。

保持激光器温度设定不变，开启 PZT 模块及扫描功能，用较大的三角波扫描幅度搜索原子共振。按照教材的寻线方法，可从约 50 mA 的工作电流附近缓慢调节，搜索过程中电流不超过 100 mA。用红外观察器观察铷泡，当出现随频率扫描闪烁的荧光亮线时，表明扫描频率已覆盖铷原子的共振区域，此时结合示波器信号继续调节。

逐渐减小 PZT 扫描幅度，并调节直流偏置，将目标谱组移至扫描区间中部，使其细节充分展开。若谱线因跳模消失，则配合微调工作电流，恢复能够连续显示谱线的扫描分支。适当调节探测器增益和示波器纵向量程，使谱峰清晰且信号不削顶；谱组在频率扫描区间中的位置由 PZT 偏置调节。结合谱峰对比度微调泵浦光与探测光的重合，并调节半波片，使泵浦强度与信号分辨率相协调。

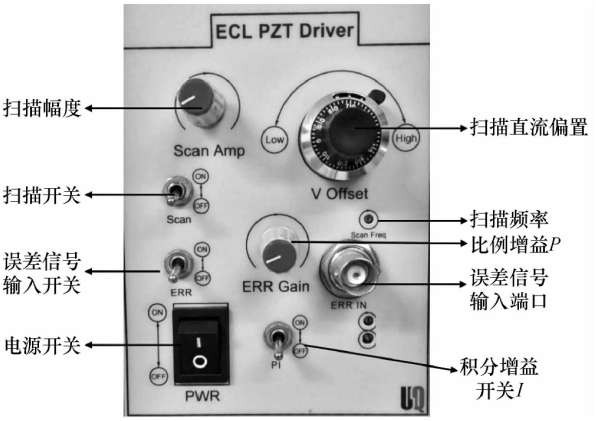


Figure 7 PZT 扫描模块面板。

2.3. 谱组观察与谱峰识别

增大扫描范围，观察可同时覆盖的谱组及跳模情况，记录实际可见的谱组数和整体谱线。随后减小扫描幅度，展开 ^{87}Rb 的 $F=2\to F'$ 谱组，对照超精细能级结构和式(7)，区分真实跃迁峰与交叉峰。记录谱峰的相对位置，并保留扫描方向、时间刻度、信号幅度及探测设置等读图所需信息。

在保持探测光和扫描条件不变时，遮挡泵浦光并记录透射谱，再恢复泵浦光记录相应谱线，比较窄峰与多普勒背景的变化。比较局部展开的谱组时，保持相同的扫描范围和探测设置。

2.4. 谱峰半高全宽测量

选取信噪比较高且便于分辨的谱峰，以待测峰附近的多普勒背景为基线，确定半峰高位置，用示波器时间光标读取两侧交点之间的时间宽度 $\delta t_{1/2}$，并保存示波器照片。参考峰中心的时间间隔 Δt_{ref} 未在现场测量，后续从同一照片中按网格估读，以已知超精细频差标定时间轴，再由式(8)估计频率半高全宽。测量期间保持工作电流、扫描幅度、光路重合状态及探测增益不变。

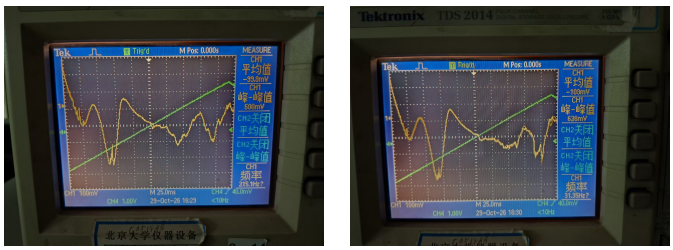
实验结束后，将激光器电流缓慢调低，按仪器操作顺序关闭电流、温度及 PZT 控制模块，关闭探测器电源和示波器，整理光学元件与工具。

3. 思考题

3.1. 实验中，获得饱和吸收谱之后，若在反射镜 2 和半透半反镜之间挡住泵浦光，那么在示波器上会看到什么？

在饱和吸收光路中，探测器接收的是探测光通过铷泡后的透射信号。泵浦光未被挡住时，泵浦光会使与其共振的速度群发生饱和，探测光的吸收减弱，因此宽的多普勒吸收本底上会叠加较窄的饱和吸收峰。图8给出了未挡光和挡光后的对比。未挡光时可以在多普勒本底上看到若干窄的峰状结构；挡住泵浦光后，按理应只剩下没有饱和吸收峰的多普勒本底。

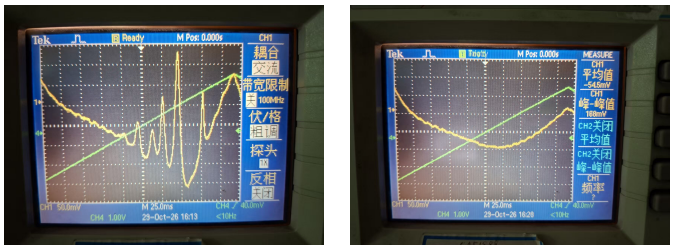
不过，图8中的挡光效果并不理想。实验中使用荧光板挡住泵浦光，透射的泵浦光仍可能进入铷泡，所以在原来吸收峰的位置仍能看到微少的类似的峰状起伏。



(a) 未挡泵浦光　　(b) 挡住泵浦光

Figure 8 大范围扫描中遮挡泵浦光前后的透射谱对比。

在第一套谱的局部展开中，挡光前后的差异更加清楚，如图9所示。未挡光时可以分辨出窄的饱和吸收峰；荧光板尽可能遮住泵浦光后，信号主要呈现平滑的多普勒本底，原有的窄峰基本消失。



(a) 未挡泵浦光　　(b) 挡住泵浦光

Figure 9 第一套谱中遮挡泵浦光前后的透射谱对比。

3.2. 实验中得到的饱和吸收谱是带多普勒本底的，试着改进图 1.9 所示的光路结构，消除多普勒本底。

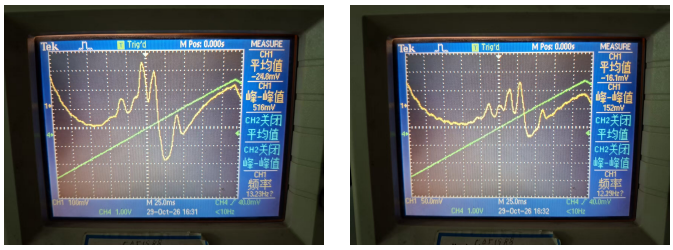
可以增加一路只测量多普勒本底的参考信号，再用差分方法消除本底。实验中的厚玻璃片前后表面会产生两个反射光斑，可以选取其中一路作为饱和吸收通道：该路保留泵浦光和探测光的反向传播结构，由第一个光电探测器接收。另一路反射光斑不再与泵浦光在铷泡中反向作用，只让探测光通过相同的铷泡和相近的光路，由第二个光电探测器接收。

在两路光功率和探测器增益适当匹配后，第二路信号主要包含与第一路相同的多普勒吸收本底，而不含饱和吸收峰。将两路信号送入减法器，或在示波器中进行等比例相减，便可保留饱和吸收峰并抑制多普勒背景。实际调节时需要先遮挡泵浦光，匹配两路本底的形状和幅度，再恢复泵浦光进行差分；否则功率不匹配会在差分结果中留下残余背景。

3.3. 解释实验中观察到的第一套谱为什么有六个峰？试解释第二套谱没有观察到明显六个峰的可能原因。

对于 ^{87}Rb 的基态 $F = 2$，D2 线有三条允许的真实跃迁 $F' = 1, 2, 3$。三条真实跃迁两两组合还会产生 $(1,2)$、$(1,3)$ 和 $(2,3)$ 三个交叉峰，所以完整的第一套谱应包含六个峰。要分辨出这六个峰，泵浦光需要达到足以产生明显饱和的强度，而探测光应保持较弱，使其主要承担读出作用。泵浦光过弱时，Bennett 烧孔不明显，较弱的真实跃迁峰容易被多普勒本底淹没；泵浦光继续增大虽然会增强饱和信号，但也会按照式(3)产生功率展宽，使相邻峰重叠。因此应通过半波片和偏振分束棱镜把泵浦光调到一个适中的范围，并同时优化两束光在铷泡中的空间重合。实验中进一步调节泵浦光功率、光路重合和扫描条件并展开谱线后，第一套谱可以分辨出六个完整峰。

第二套谱对应另一组基态超精细跃迁，理论上同样包含三条真实跃迁和三个交叉峰，但各峰的跃迁强度、峰间隔和重叠程度不同。泵浦光功率、两束光的空间重合、扫描分支和示波器量程都会改变峰的对比度。图10显示，在相近的第二套谱区域，先能辨认出五条谱线，进一步调节后又能看到六条谱线。



(a) 可辨认出五条谱线　　(b) 调节后可辨认出六条谱线

Figure 10 第二套谱在不同调节状态下的峰分辨情况。

3.4. 试分析 795 nm 的铷原子饱和吸收谱，每套谱应该会有几个峰？

795 nm 附近对应铷原子的 D1 线，即 $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$ 跃迁。对每一个基态超精细能级，电偶极选择定则只允许通向两个激发态超精细能级的跃迁。因此，每套谱包含两条真实跃迁；两条真实跃迁还会在其频率中点形成一条交叉峰，故每套谱应有三个峰。

天然铷包含 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 两种同位素，每种同位素有两个基态超精细能级，所以完整的 D1 饱和吸收谱可分为四套，每套三个峰，共有十二个峰位。图11为讲义中的典型 795 nm 饱和吸收谱，标出了四套谱中的真实跃迁峰和交叉峰；实际可分辨的峰数还受到谱组重叠及信号强弱的影响。

4. 分析讨论

4.1. 光路搭建与共振调节

按照教材步骤，实验先将激光器工作电流设为 50 mA，确认出光后依次安装并调节光学元件。首先调节光隔离器

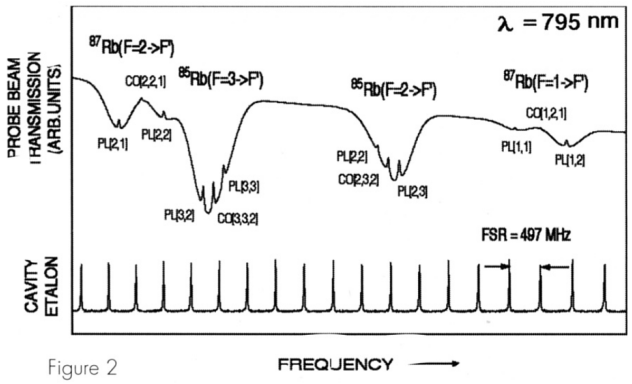


Figure 2

Figure 11 铷 D1 线典型饱和吸收谱（795 nm）。

的位置和角度，其前、后的光功率分别为 7.89 mW 和 6.53 mW，由此得到正向功率透过率

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{6.53}{7.89} \times 100\% \simeq 82.8\%. \tag{9}$$

透过率超过 80%，达到光路调节要求。随后利用半波片和偏振分束棱镜调节进入实验光路的功率，以厚玻璃片分出较弱的探测光和较强的泵浦光，并调节反射镜，使两束光在铷泡中反向传播、空间重合。将光电探测器置于探测光透射端并连接示波器，完成饱和吸收光路的搭建。

在此基础上，保持温度设定不变，开启 PZT 扫描，并从 50 mA 附近缓慢增加工作电流。当电流约为 66 mA 时，在铷泡内观察到共振荧光亮线，记录如图12所示。这一现象说明激光扫描已进入铷原子的共振频率区域：原子吸收激光后跃迁至激发态，再通过自发辐射产生荧光。以此作为寻线标志，随后结合示波器上的透射信号调节扫描中心和幅度，展开饱和吸收谱。



Figure 12 工作电流约为 66 mA 时的铷泡共振荧光。

4.2. 大范围扫描与跳模现象

图13给出了增大扫描范围后的透射信号，黄色曲线为 CH1 探测光信号，绿色曲线为 CH4 扫描驱动信号。本次记录中能够辨认出前三套谱，但未同时获得完整的四套谱。在本应继续寻找第四套谱的位置，结合调节时观察到的跳模现象，该处结构应为跳模后重复扫描到的第三套谱。

PZT 驱动电压连续变化时，激光频率只在同一纵模分支内连续调谐；发生跳模后，频率会离散跳变。因此，示波器上依次出现的谱组结构未必对应依次增加的原子跃迁频率。该记录反映出连续调谐范围对全谱观测的限制，后续局部谱峰识别和线宽标定均选取同一连续扫描分支。

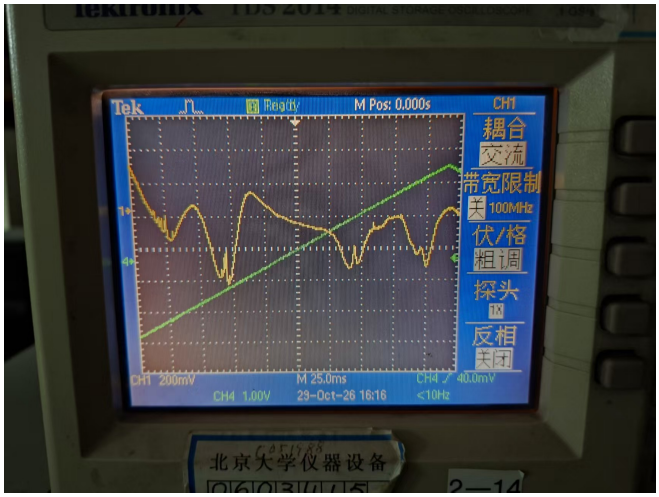


Figure 13 大范围扫描下的铷 D2 线透射谱。

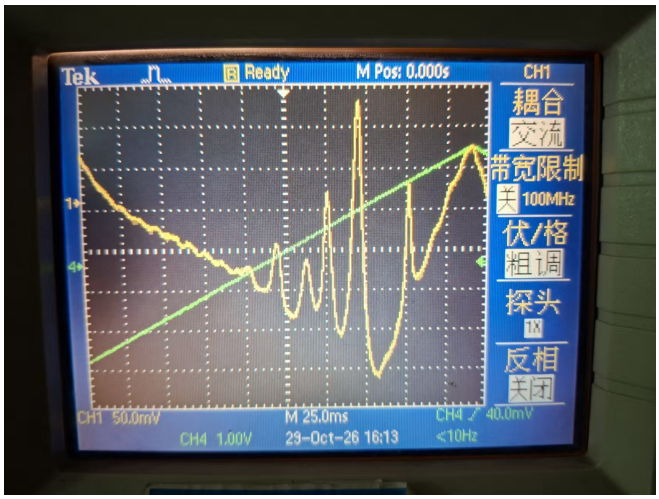


Figure 14 ^{87}Rb 第一套饱和吸收谱的局部展开。

4.3. 第一套谱的展开与峰的识别

减小扫描范围并调节偏置后，第一套谱的局部记录如图14所示。宽的多普勒吸收背景上叠加了窄的向上透射峰，说明泵浦光使特定速度群的吸收饱和，从而提高了探测光的透射率。该组对应 ^{87}Rb 的 $F = 2 \to F' = 1, 2, 3$ 跃迁，包含三条真实跃迁峰和三条交叉峰。

结合图1的能级间隔和式(7)，将图14从左到右的六个峰依次归属为 $F'=1$、$(1,2)$ 交叉峰、$F'=2$、$(1,3)$ 交叉峰、$(2,3)$ 交叉峰和 $F'=3$。其中第一个峰较弱，第五个峰较强，适合用于半高全宽的读取。各峰高度不同与跃迁强度、光抽运和饱和程度有关；调节功率时需要兼顾峰的对比度与功率展宽。

4.4. 交叉峰半高全宽的标定与讨论

图15给出了信噪比最大的第五个峰，即 $(2,3)$ 交叉峰的半高全宽测量记录。以窄峰附近的多普勒本底为基线确定半峰高位置，现场记录的两侧时间光标间隔为 $\delta t_{1/2}=10\,\mathrm{ms}$。

标定频率轴时，取同一照片中从左数第三个峰（$F=2\to F'=2$）和第六个峰（$F=2\to F'=3$）作为参考，其频差约为 267 MHz。两参考峰间距 $\Delta t_{\mathrm{ref}}\simeq 86\,\mathrm{ms}$。由式(8)得到

$$\begin{aligned}\Delta\nu_{1/2} &\simeq 267\,\mathrm{MHz}\times\frac{10\,\mathrm{ms}}{86\,\mathrm{ms}}\\ &\simeq 31\,\mathrm{MHz}.\end{aligned}\tag{10}$$

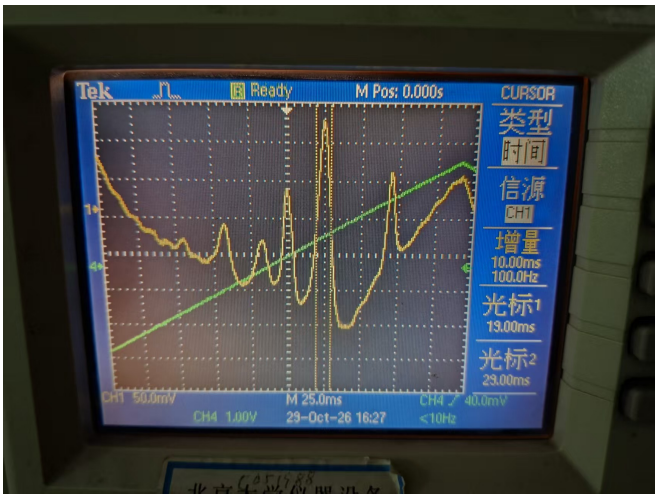


Figure 15 第一套谱 $(2,3)$ 交叉峰的半高全宽测量。

5. 实验总结

本实验完成了铷原子饱和吸收光路的搭建，测得光隔离器正向透过率约为 82.8%，并在工作电流约为 66 mA 时观察到共振荧光。扫描激光频率后辨认出三套饱和吸收谱，第四套谱所在区域出现的结构应为跳模后重复扫描到的第三套谱，体现了激光器连续调谐范围对全谱观测的限制。局部展开第一套谱后，识别出 ^{87}Rb 的三条真实跃迁峰和三条交叉峰；遮挡泵浦光的对比表明，充分挡光后窄峰基本消失，保留宽的多普勒吸收本底，说明窄峰来源于泵浦光与探测光对共同速度群的饱和作用。对信噪比最大的 $(2,3)$ 交叉峰，时间半高全宽为 10 ms，以 267 MHz 的已知频差的参考峰间距进行标定，得到观测半高全宽约为 31 MHz。测量过程中曾出现谱线形状不佳、噪声较大和弱峰难以辨认等问题，通过微调铷泡位置及泵浦光与探测光的对齐状态，谱峰的清晰度和信号质量得到了一定改善。这一调节过程表明，光束在气室中的有效重合是获得清晰饱和吸收信号的重要条件，也使实验中观察到的谱峰结构与速度群选择、交叉共振等物理机制建立了更直观的联系。实验不仅加深了对铷原子超精细结构的理解，也体现了精细光路调节对光谱分辨和可靠测量的重要作用。

6. 致谢

感谢王青老师在实验中的讲解和指导。

参考文献

[1] 陈徐宗, 王青, 齐向晖, 王爱民, and 赖舜男, 高级光电子技术实验 (北京大学出版社, 北京, 2018).